

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Болюх В.Ф., Рассоха М.А., Шукин И.С.

Национальный технический университет «ХПИ», ООО Фирма «ТЭТРА, Ltd»,
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, Тел. (057) 70-76-427,
E-mail: bolukh@kpi.kharkov.ua, tech@tetra.kharkiv.com.

Annotation – Pulse modulation excitation system for impact electromechanical launcher is described. Pulse modulation for increasing launcher work characteristic is proposed. Using two consistently connected actuators with pulse modulation excitation system for efficiency launcher increasing is investigated. Recommendation for choosing of modulation parameters are given in this material.

Key words - electromechanical launcher, pulse modulation, electrical to mechanical conversion efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Индукционно-динамические двигатели (ИДД) применяются для создания мощных силовых импульсов при решении разнообразных технических задач вибрационного воздействия, деформации и перфорации обрабатываемых поверхностей и объектов [1-3]. ИДД характеризуются относительно невысокой эффективностью преобразования электрической энергии емкостного накопителя (ЕН) в механическую из-за несогласованности импульсных электрических, магнитных, и механических процессов [4]. Вследствие этого в процессе работы ослабляется магнитная связь между индуктором и ускоряемым якорем, возникает «паразитная» (тормозная) сила, не полностью используется энергия ЕН. Одним из путей устранения указанных недостатков является импульсная модуляция тока индуктора, осуществляемая с помощью современных силовых электронных ключей [5, 6].

Целью работы является повышение эффективности ИДД, возбуждаемого от полярного ЕН апериодическим импульсом тока, за счет импульсной модуляции тока в индукторе.

КОНСТРУКЦИИ И СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИДД

Базовый вариант ИДД дисковой конфигурации состоит из индуктора 1', заключенного в диэлектрический корпус 3, и электропроводящего якоря 2', прикрепленного к ударному элементу 5 с бойком 6, направленным в сторону поверхности 7 деформируемого объекта (рис.1). Пружина 4, которая прижимает якорь к индуктору и возвращает его в исходное положение после завершения удара, крепится на патроне 8.

Электрическая схема базового ИДД приведена на рис.2. ЕН C заряжается до напряжения U_0 от источника постоянного напряжения ИПН. При подаче сигнала управления на ГТО-тиристор VT_1 , ЕН разряжается на индуктор с индуктивностью L'_1 и сопротивлением R'_1 . При этом возбуждается магнитное поле, которое в якоре с сопротивлением $R'_2(T'_2)$ и индуктивностью L'_2 наводит ток, вследствие чего возникает электродинамическая сила f_z , перемещающая якорь.

Возбуждение индуктора осуществляется апериодическим импульсом, что позволяет использовать в качестве ЕН электролитические конденсаторы [4]. Для этого индуктор шунтирован обратным диодом VD_1

через резисторы с сопротивлениями R'_{o1} и R'_{o2} , обеспечивающими различную скорость затухания тока индуктора ($R'_{o2} \gg R'_{o1}$).

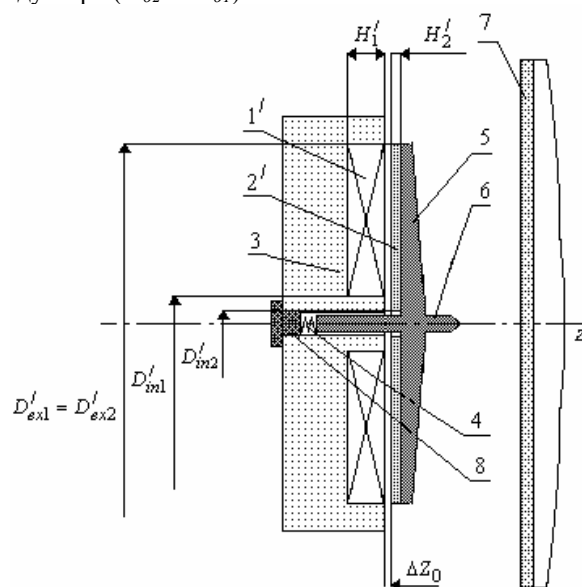


Рис.1

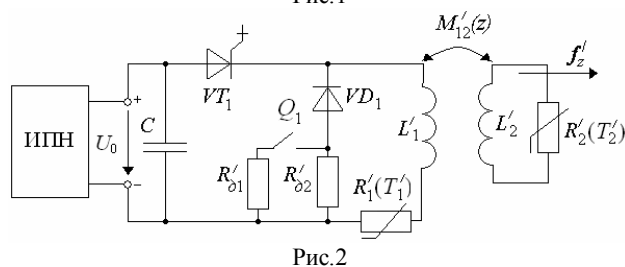


Рис.2

Импульсная модуляция тока возбуждения ИДД позволяет прерывать его в любой момент времени путем закрывания тиристора VT_1 при разомкнутом ключе Q_1 . При этом ток в индукторе замыкается через обратный диод VD_1 и резистор R'_{o2} .

Модифицированный вариант ИДД, обеспечивающий более полное использование энергии ЕН, дополнительно к базовому варианту содержит цилиндрический индуктор 1'', аксиально смещенный относительно дискового индуктора 1', и цилиндрический якорь 2'', закрепленный на ударном элементе 5 (рис.3). (на рис.1 и рис.3 выполнены одинаковые обозначения элементов).

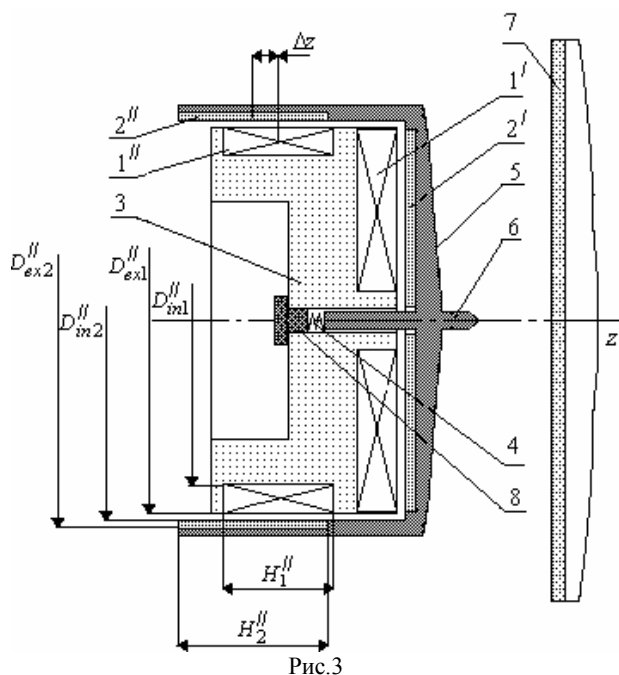


Рис.3

Дисковый и цилиндрический индукторы параллельно подключены к ЕН с помощью тиристоров соответственно VT_1 , VT_2 и шунтированы обратными диодами соответственно VD_1 , VD_2 (рис.4). При подаче сигнала на выключение тиристора ток в индукторе прерывается, замыкаясь через обратный диод и резистор с большим сопротивлением.

Импульсная модуляция позволяет осуществить последовательное возбуждение дискового, а затем цилиндрического индукторов, обеспечивающих двухступенчатое ускорение якоря комбинированной конфигурации. В табл.1 приведены значения основных параметров модифицированного ИДД.

Таблица 1

Параметр	Значение
Дисковые индуктор и якорь	
Внешний диаметр индуктора D_{ex1}^{II} , мм	100
Внутренний диаметр индуктора D_{in1}^{II} , мм	10
Высота индуктора H_1^{II} , мм	10
Внешний диаметр якоря D_{ex2}^{II} , мм	100
Внутренний диаметр якоря D_{in2}^{II} , мм	6
Высота якоря H_2^{II} , мм	2,5
Количество витков N' , шт	46
Сечение витка $a' \times b'$, мм ²	1,8×4,8
Коэффициент упругости K_p , кН/м	7,5
Цилиндрические индуктор и якорь	
Внешний диаметр индуктора D_{ex1}^{II} , мм	100
Внутренний диаметр индуктора D_{in1}^{II} , мм	80
Высота индуктора H_1^{II} , мм	35
Внешний диаметр якоря D_{ex2}^{II} , мм	106
Внутренний диаметр якоря D_{in2}^{II} , мм	102
Высота якоря H_2^{II} , мм	50
Количество витков индуктора N'' , шт	16
Сечение витка индуктора $a'' \times b''$, мм ²	3,2×4,8
Напряжение ЕН U_0 , кВ	1,0

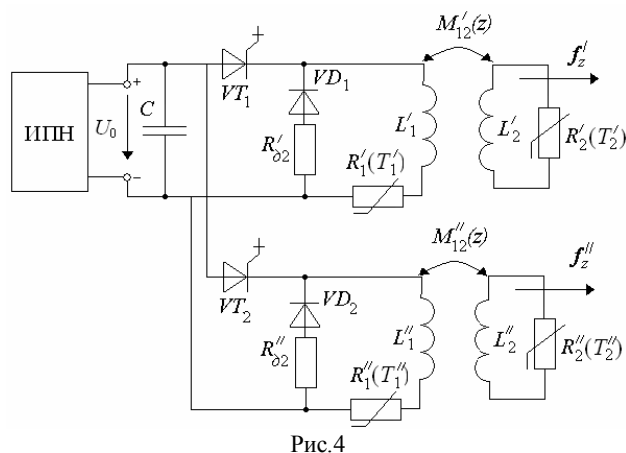


Рис.4

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИДД

Считая тиристоры идеальными и учитывая неравномерность распределения индуцированного тока в массивном якоре, запишем уравнения, описывающие электромагнитные процессы в ИДД:

$$R_1(T_1)i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^{t_p} i_1(t) dt + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0, \quad (1)$$

$$R_1(T_1)i_1(t) + R_q i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12}(z) \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_2(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_n(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = U_0, \quad (2)$$

$$R_q = \begin{cases} R_{\partial 1}, q = 1; \\ R_{\partial 2}, q = 2; \end{cases}$$

$$R_2(T_2)i_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21}(z) \frac{di_1}{dt} + M_{23}(z) \frac{di_3}{dt} + \dots + M_{2n}(z) \frac{di_n}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{12}}{dz} = 0;$$

.....

$$R_n(T_n)i_n(t) + L_n \frac{di_n}{dt} + M_{n,1} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{n,n-1}(z) \frac{di_{n-1}}{dt} + i_1(t)V(t) \frac{dM_{1n}}{dz} = 0, \quad (3)$$

где 1 – индекс индуктора; 2,...,n – индексы элементарных контуров якоря, который движется со скоростью $V(t)$; $R_p(T_p)$, L_p , i_p , T_p – соответственно, сопротивление, индуктивность, ток и температура p -го элементарного контура якоря; M_{nk} – взаимоиндуктивность между n -ым i k -ым контурами; t_p – длительность разрядного импульса.

Уравнение (1) описывает процессы в цепи индуктора при разряде на него ЕН. Уравнение (2) описывает процессы в цепи индуктора при замыкании тока через обратный диод и резистор с малым $R_{\partial 1}$ ($q=1$) или большим $R_{\partial 2}$ сопротивлением ($q=2$).

Система уравнений (3) описывает процессы в массивном якоре, разбитом на совокупность короткозамкнутых коаксиальных контуров.

На якорь со стороны индуктора действует импульс силы:

$$FI = \int_0^t f_z(t, z) dt \quad (4)$$

где $f_z(t, z)$ - мгновенное значение электродинамической силы:

$$f_z(t, z) = i_1(t) \sum_{p=2}^n i_p(t) \frac{dM_{1p}}{dz}(z) \quad (5)$$

Уравнения (1 – 5) справедливы как для базового, так и для модифицированного вариантов ИДД.

Скорость якоря определяется соотношением:

$$V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_{ank}} \left\{ i_1(t_n) \sum_{p=2}^n i_p(t_n) \frac{dM_{1p}}{dz}(z) - K_p \Delta Z(t_n) - \frac{\pi}{8} \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t_n) \right\}, \quad (6)$$

где m_{ank} - общая масса якоря и ударного элемента; $\Delta Z(t_n)$ - величина перемещения якоря; γ_a - плотность рабочего пространства (воздуха); β_a - коэффициент аэродинамического сопротивления.

Работу ИДД оценим при помощи критерия эффективности η :

$$\eta(t) = \frac{m_{ank} \cdot V^2(t)}{C \cdot (U_0^2 - u_c^2(t))} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где $u_c(t)$ - напряжение ЕН.

С целью подтверждения теоретических моделей были проведены исследования модельного ИДД, у которого индуктор диаметром 70 мм содержит 60 витков медного провода диаметром 1,1 мм, а якорь выполнен из медного диска диаметром 50 мм и толщиной 2,5 мм при использовании ЕН с параметрами $U_0 = 0,26$ кВ, $C = 0,66$ мФ (рис.5).

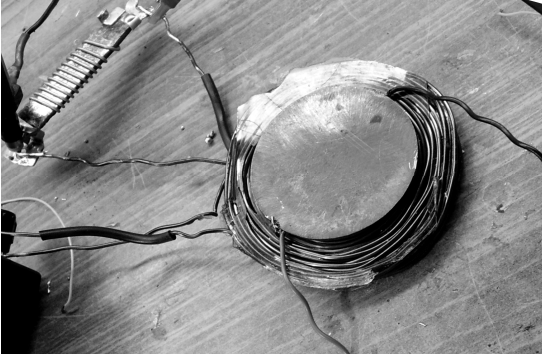


Рис.5

На рис.6 представлены осциллограммы токов в индукторе i_1 и яоре i_2 , а на рис.7 - расчетные кривые плотностей тока в индукторе j_1 и яоре j_2 модельного ИДД. Данные экспериментальные и расчетные зависимости согласуются между собой с точностью до 7 %, что свидетельствует об адекватности математической модели.

На рис.8 для базового варианта ИДД показаны плотности токов в дисковых индукторе j_1 и яоре j_2 , напряжение ЕН u_c , электродинамическая сила f_z и импульс силы FI при использовании ЕН с параметрами $U_0 = 1$ кВ, $C = 2,5$ мФ. Масса якоря с ударным элементом составляет $m_{ank} = 1$ кг.

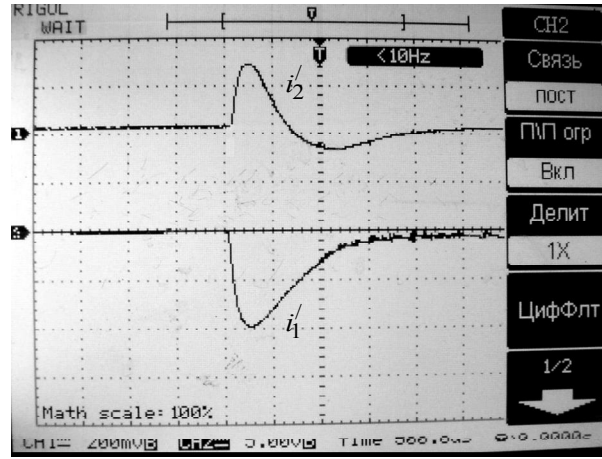


Рис.6

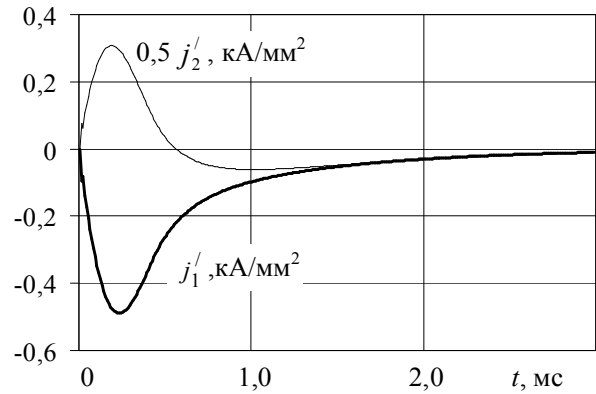


Рис.7

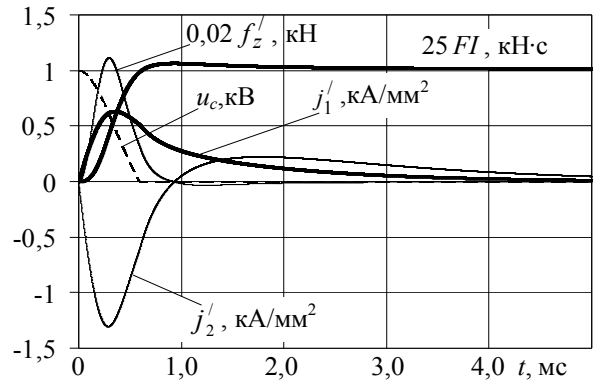


Рис.8

До момента времени t_{u0} - достижения напряжением ЕН нулевого значения, ток в цепи индуктора описывается уравнением (1). После момента времени t_{u0} индуктор замыкается обратным диодом VD_1 с резистором R_{dl} , и ток определяется уравнением (2) при $q=1$. При апериодическом импульсе тока индуктора возникает смена полярности тока якоря в момент t_{f0} , что приводит к возникновению тормозной (притягивающей) силы f_z , уменьшающей результирующий импульс силы FI .

ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ТОКА

Импульсная модуляция с прерыванием апериодического импульса тока индуктора в момент времени $t_{int} = t_{f0}$ позволяет устранить отрицательную силу при $t > t_{f0}$ и избежать ее негативного влияния на резуль-

тирующий импульс силы (рис.9). При модуляции ток индуктора в момент времени $t > t'_{j0}$ описывается уравнением (2) при $q=2$.

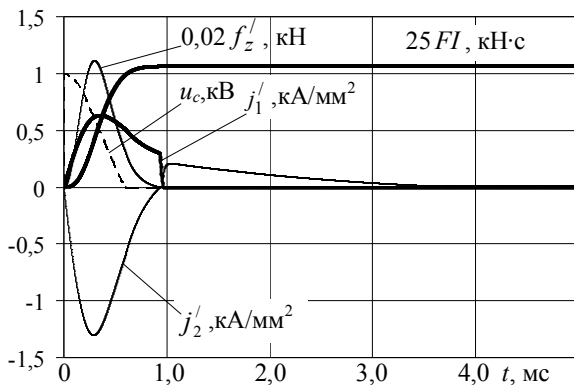


Рис. 9

В данном случае при $t < t'_{j0}$ нецелесообразно прерывание тока в индукторе, так как это приводит к уменьшению как импульса силы FI , так и параметра эффективности η (рис.10).

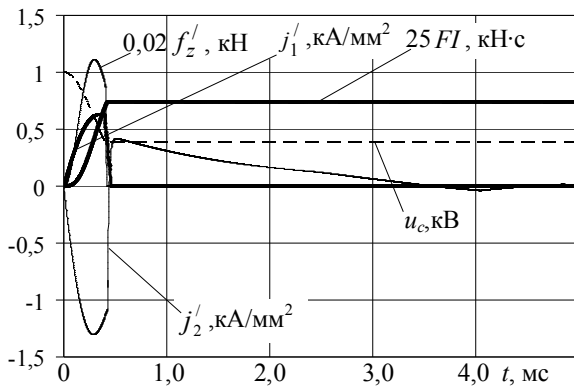


Рис.10

При использовании ЕН повышенной емкости возникает существенный сдвиг фаз между токами в якоре и индукторе. На рис.11 представлены электромеханические характеристики для ИДД при $C=25$ мФ.

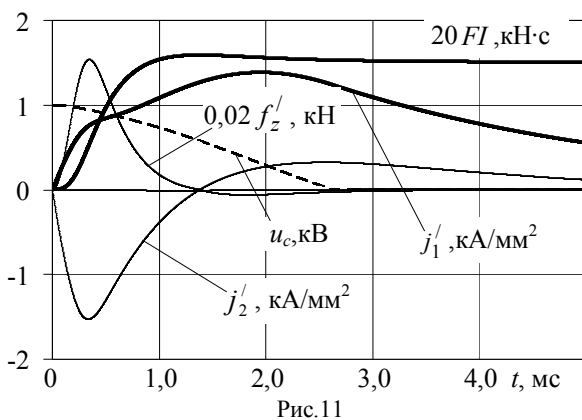


Рис.11

Импульсная модуляция аperiodического импульса тока в момент времени $t_{int} = t'_{j0}$ ($R'_{d2} = 1,0$ Ом) позволяет устранить отрицательную силу при $t > t'_{j0}$ и сохранить часть энергии ЕН, повысив эффективность преобразования энергии в ИДД (рис.12).

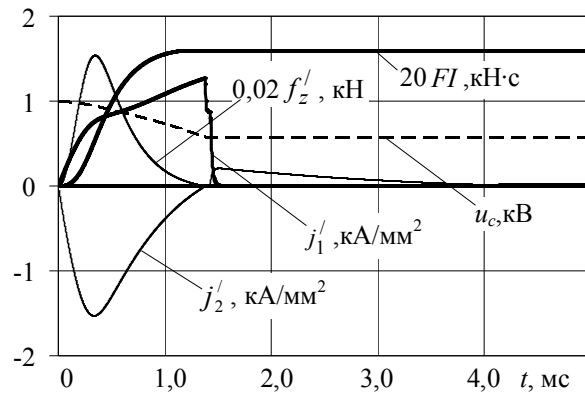


Рис.12

Сохраненную в ЕН энергию можно использовать для дальнейшего ускорения якоря. С этой целью применяется модифицированная конструкция ИДД (рис.3) со схемой возбуждения (рис.4). Подключение цилиндрического индуктора к ЕН в момент времени $t_2 = t'_{j0} + \Delta t_{mod}$ (после прерывания тока в дисковом индукторе) позволяет направить сохраненную энергию на создание электродинамической силы f'_z , действующей на якорь и увеличивающей импульс силы FI (рис.13). При этом в цилиндрическом индукторе протекает ток плотностью j'_1 , а в цилиндрическом якоре – плотностью j'_2 .

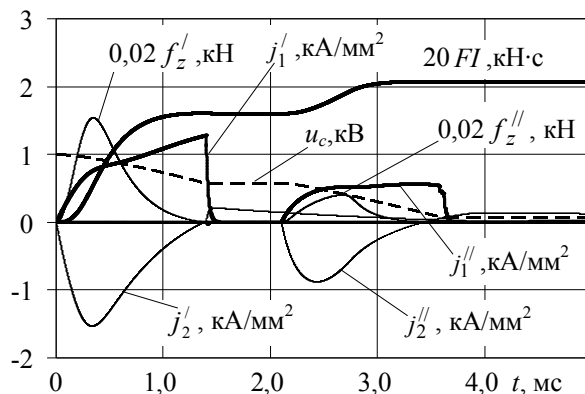


Рис.13

Направление действия силы f'_z при включении цилиндрического индуктора зависит от смещения центра масс Δz цилиндрического якоря относительно цилиндрического индуктора. Если центр масс цилиндрического якоря смещен относительно центра масс цилиндрического индуктора в направлении объекта удара, то направление силы f'_z совпадает с направлением движения якоря, дополнительно ускоряя его.

На рис.14 представлена зависимость параметра эффективности η модифицированного ИДД по отношению к величине η_0 базового ИДД при t'_{j0} ($\eta^* = \eta/\eta_0$) от интервала задержки тока Δt_{mod} . При малых значениях Δt_{mod} параметр η модифицированного ИДД меньше, чем у базового, вследствие тормозящего действия цилиндрического индуктора. Однако при увеличении Δt_{mod} якорь успевает сместиться в сторону поверхности удара на достаточное расстояние, чтобы интеграл силы f'_z был положителен и увеличивал па-

параметр η ИДД. При дальнейшем увеличении Δt_{mod} цилиндрическая часть якоря начинает выходить за пределы зоны эффективного магнитного взаимодействия с цилиндрическим индуктором, что негативно отражается на величине параметра эффективности η ИДД.

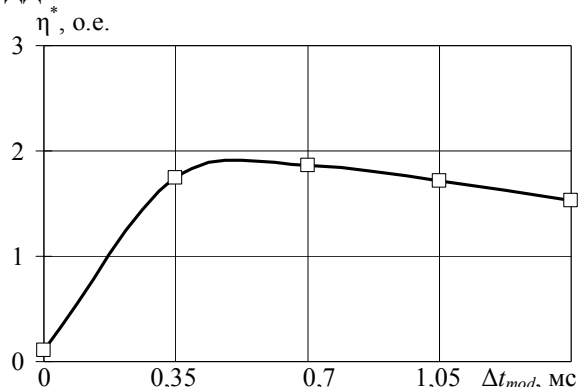


Рис.14

Импульсная модуляция тока возбуждения в дисковом индукторе в момент времени $t_{int} < t_{f0}$ с последующим подключением ЕН к цилиндрическому индуктору позволяет еще более увеличить импульс силы, действующей на якорь. Это происходит за счет того, что при $t \rightarrow t_{f0}$ приращение импульса силы FI замедляется, а напряжение u_c , наоборот снижается быстрее (рис.12,13). Таким образом, наблюдается все меньшее приращение скорости якоря при все большем расходе энергии ЕН, что приводит к уменьшению параметра η . Прерывание импульса тока при $t_{int} < t_{f0}$ препятствует не эффективному расходованию энергии ЕН, увеличивает FI и η (рис.15).

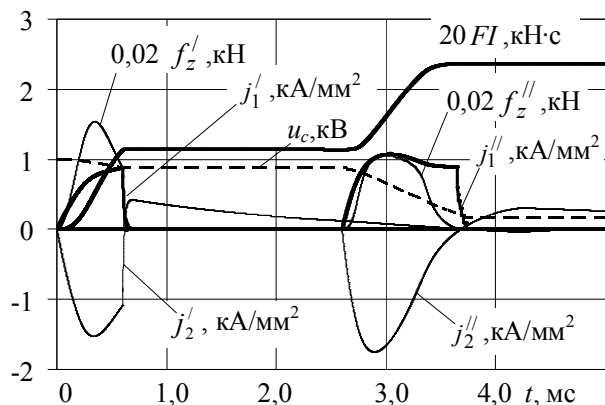


Рис.15

На импульс силы, действующий на якорь со стороны дискового индуктора, влияет скорость затухания тока, зависящая от величины сопротивления резистора R'_{o2} . На рис. 16 представлены электромеханические характеристики ИДД для $t_{int}=0,6$ мс (как и на рис.13), но при $R'_{o2} = 0,1$ Ом. Уменьшение сопротивления R'_{o2} (а значит увеличение времени затухания тока) повышает импульс силы FI за счет более полного использования энергии магнитного поля, запасенной в якорь и индукторе (рис.16).

На рис.17 представлена зависимость η^* от времени прерывания t_{int} ($R'_{o2} = 1,0$ Ом). Время включения цилиндрического индуктора $t_2 = t_{int} +$

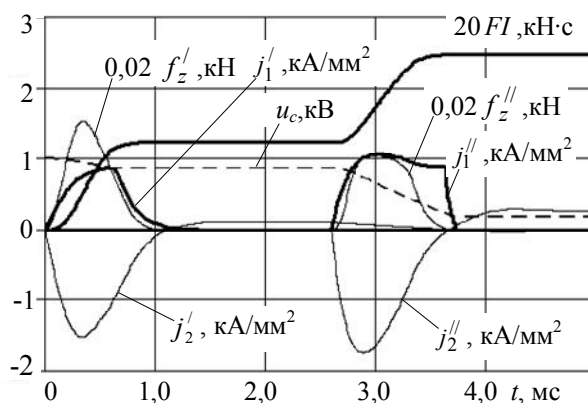


Рис.16

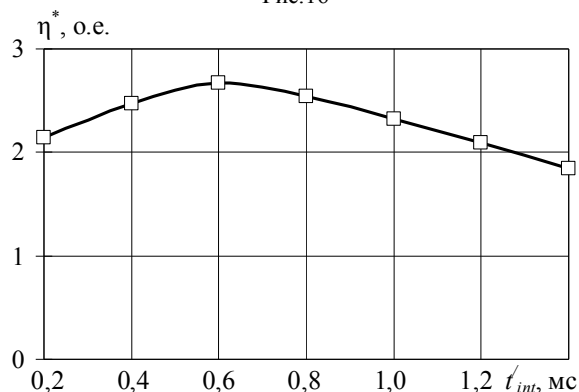


Рис.17

При этом для каждого t_{int} выбиралось такое Δt_{mod} , которое обеспечивало бы максимум η^* . При уменьшении t_{int} параметр η^* сначала растет, однако затем начинает снижаться. Уменьшение t_{int} приводит к увеличению кинетической энергии, сообщаемую якорю цилиндрическим индуктором W_{kin}^* , но при этом уменьшается энергия, получаемая от дискового индуктора $W_{kin}^{/*}$ (рис.18).

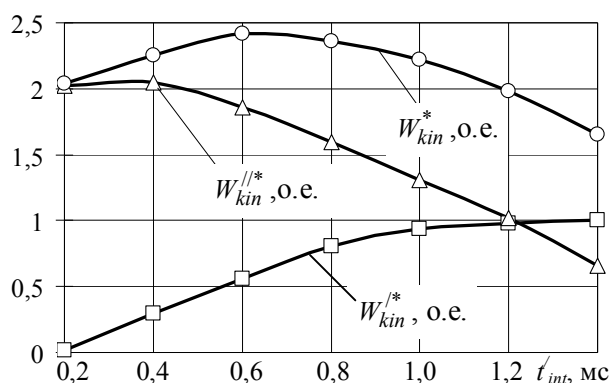


Рис.18

Как следует из рис.19, максимальный импульс силы FI^* достигается при равенстве импульсов силы, передаваемых якорю от дискового (FI^*) и цилиндрического ($FI^{/*}$) индукторов. Но уменьшать время t_{int} свыше определенного значения нецелесообразно, по-

сколькx это не позволяет воспользоваться в полной мере возможностями дискового индуктора.

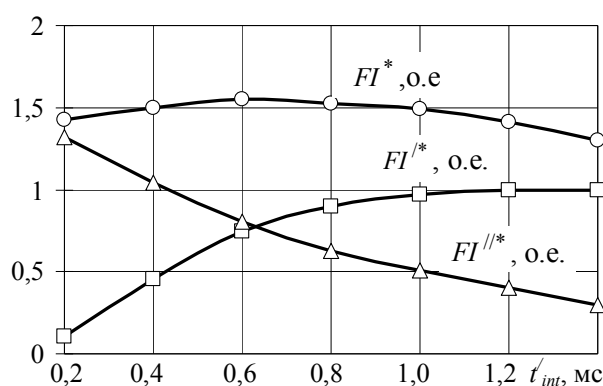


Рис.19

Эффективность ИДД растет при увеличении общей массы якоря и ударного элемента m_{ank} в интервале от 0,5 до 5 кг (рис.20) для рассматриваемых параметров устройства и ЕН ($C=25$ мФ). Это связано с более продолжительным сохранением сильной магнитной связи между дисковым индуктором и якорем из-за более медленного ускорения последнего.

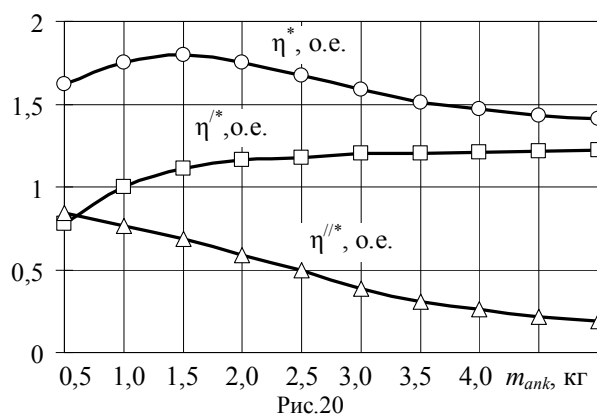


Рис.20

Однако при этом уменьшается количество энергии, которую можно было бы перенаправить в цилиндрический индуктор модифицированного ИДД. Это приводит к уменьшению величины параметра $\eta^{//}$, отражающего эффективность цилиндрического индуктора. Параметр η^* показывает полную эффективность модифицированного ИДД. При увеличении ускоряемой массы параметр η^* растет, но лишь до определенного предела. Это связано с тем, что при увеличении массы якоря рост η^* замедляется, а уменьшение $\eta^{//}$ — ускоряется. Подобные тенденции объясняются большей инертностью массивных якорей. Как следует из рис.20, разрыв между η^* и $\eta^{//}$ с ростом массы якоря сокращается, поэтому для массивных якорей нет смысла использовать дополнительный индуктор.

Фазовый сдвиг между токами в индукторе и якоре обуславливает различный характер влияния величины сопротивления $R_{\partial 2}$ на FI^* при разных t_{int} (рис.21). При $t_{int} \rightarrow t_{f0}$ ($t_{int}=1,0$ мс) рост сопротивления $R_{\partial 2}$ увеличивает FI вследствие устранения тормозной силы. При более ранних обрывах тока в ин-

дукторе, наоборот, наблюдается уменьшение FI с ростом $R_{\partial 2}$ в результате рассеяния энергии на резисторе.

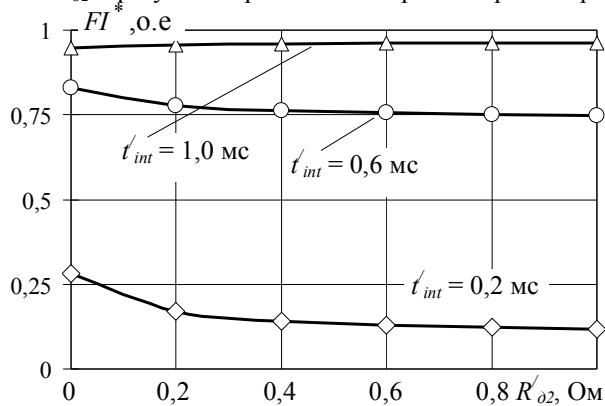


Рис.21

ВЫВОДЫ

Предложена схема питания ИДД с импульсной модуляцией тока индуктора, позволяющая устранить тормозную электродинамическую силу, сохранить энергию в ЕН и/или перенаправить ее в секцию индуктора, обеспечивающую дополнительное ускорение якоря.

Предложена конструкция ИДД, в которой последовательно возбуждается дисковый и цилиндрический индукторы, обеспечивающие ступенчатое ускорение якоря комбинированной конфигурации. Указанные усовершенствования целесообразно применять при большом фазовом сдвиге между токами в индукторе и якоре.

- [1]. Татмышевский К.В., Козлов С.А. «Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия» // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2005. №12. – С. 52–57.
- [2]. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. «Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок» // *Авиационно – космическая техника и технология*. – 2007. - №11 (47). – С. 109 – 117.
- [3]. Тюткин В.А. «Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов» // *Электротехника*. - 2002. - № 11. - С. 24-28.
- [4]. Болюх В.Ф., Марков А.М., Лучук В.Ф., Щукин И.С. «Теоретические и экспериментальные исследования индукционно-динамического двигателя, возбуждаемого от полярного емкостного накопителя» // *Техн. электродинамика. Тем. выпуск: Проблемы современной электротехники*. - 2006. - Ч. 2. - С. 65-70.
- [5]. Пат. 011246 ЕП, МПК H01F 7/06. Электродинамический привод / В.И. Кулыгин, И.О. Кирилюк, В.А. Когородский, С.Г. Ломов. – Заявл. 19.07.2006. – Оpubл. 27.02.2009.
- [6]. Болюх В.Ф., Рассоха М.О. Імпульсний переривання струму індуктора електромеханічного імпульсного перетворювача // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. - № 41. – С. 8-15.